

힘 센서를 이용한 CMM 용 프로브 개발을 위한 연구

승광석*, 권기환, 박재준 (한양대 대학원 정밀기계공학과), 조남규 (한양대 기계공학과)

A Study on the Development of the CMM Probe using Force-Sensor

K.S. Song, K.H. Kwon, J.J. Park (Precision Mecha. Eng. Dept. HYU), N.G. Cho (Mechanical Eng. Dept. HYU)

ABSTRACT

In this paper, a mechanical probe for CMM (Coordinate Measuring Machine) with a three-axis force-sensing unit is proposed, which is capable of measuring an actual contact position without the lobbing effect and the pre-travel error. The force-sensing unit detects the external force, which is act on the stylus of CMM during the measuring process. Thus, the contact point of the stylus of CMM can be estimated from the direction of measured force components. Based on the structural analysis of the proposed CMM probe, the transformation matrix is derived and calibrated so that it shows linear relationships between the estimated force components from the output voltages and the real input forces. And, the relationships are verified through the computer simulation. The results show that the proposed mechanical probe is very useful for detecting the contacting force components on measuring process of CMM.

Key Words : CMM (3 차원 좌표측정기), Force sensor (힘 센서), Strain gauge (스트레인 게이지), Probe (프로브), Precision measurement (정밀 계측)

1. 서론

물체의 형상을 빠르고 정확하게 측정하여 3 차원의 형상 정보를 얻는 장비로, 가공된 제품이나 부품의 실제 치수와 설계치수 비교와 도면이 없는 제품의 역 설계에 주로 사용되고 있는 CMM (Coordinate Measuring Machine)은 최근 정밀화, 자동화에 의해 다수의 동일 측정 대상을 보다 정확하면서도 쉽고 빠르게 측정할 수 있도록 발전하고 있다.

이와 같이 기계부품의 고정밀화 경향에 따라 더욱 사용범위가 확대되고 있는 CMM의 측정방식은 접촉식 프로브를 이용하는 접촉식과 레이저 간섭계나 CCD 카메라 등을 이용하는 비접촉식의 두 종류로 크게 구분되며, 비접촉식보다는 접촉식이 주로 사용되고 있다. 또, 접촉식 프로브는 고정식, 트리거식, 변위식으로 분류되며 볼 프로브, 디스크 프로브, 포인트 프로브, 원통 프로브, 원추 프로브 등이 있다. 이 중 일반적으로 사용되는 볼 프로브 트리거 방식은 크게 3 가지의 문제점이 있다.¹⁾²⁾ 첫째, 3 점 지지를 기본으로 하고 있기 때문에 측정결과가 삼각형 모양으로 왜곡되는 단점을 갖고 있으며, 둘

째로 접촉점의 위치 파악을 위한 트리거 신호의 발생 위치와 트리거 신호에 의한 정지 명령에 따라 실제로 프로브가 정지된 위치의 차에 의한 pre-travel 오차가 있다.³⁾⁴⁾ 그리고, 셋째로 직접적인 접촉점을 측정할 수 없고 프로브의 작동 중심위치만 측정이 가능하므로, 측정력에 의한 프로브의 변형 및 프로브 선단에서의 실제 접촉 위치 파악이 곤란한 점 등에 의한 측정 오차가 그것이다.

현재, 상용화되어 있는 시판의 CMM에서는 이러한 문제점들에 대한 대책으로 2 차원적인 데이터 처리를 통한 보정기술의 적용이 일반화되어, 삼각형 형상의 왜곡과 pre-travel 오차 문제를 어느 정도 해결하였다고는 하나, 3 차원적인 실제 측정 대상물의 측정 데이터를 보정하기 위해서는 보다 많은 측정 데이터를 필요로 하여, 측정 시간과 데이터량을 고려할 때 효과적이지 못할 뿐 아니라 보정 역시 불완전한 실정이다. 더욱이 프로브 작동중심위치 측정에 의한 영향을 없애기 위해 현재 적용되고 있는 해결책으로는 측정점의 수를 늘려 보간에 의한 실제 접촉 위치 추정법을 적용하고, 프로브의 강성 설계에 의존한 변형 오차 최소화를 꾀하는 등의 방

법이 적용되고는 있다. 그러나 이 방법 역시 근본적인 해결이 못되며, 완전한 보정이 곤란할 뿐 아니라 적용상의 많은 문제점을 안고 있다.

이와 같은 배경으로부터, 본 논문에서는 측정 데이터의 왜곡과 pre-travel 오차발생을 피함과 동시에 접촉점의 위치를 직접 검출할 수 있도록, 3 각 다리구조를 갖는 힘-토크센서에 볼 프로브를 장착하여 프로브에 가해지는 외력의 크기와 방향을 측정하고, 그로부터 접촉점의 위치를 추정하는 새로운 방식의 프로브를 개발하였다.

2. 프로브의 구조해석

2.1 기본구조

기존의 문제점을 해결하기 위한 여러 방식의 프로브 개발들이 보고 되고 있으나,^{5), 6), 7)} 일반적으로 구조가 복잡하여 실제 사용에는 문제가 있다. 따라서, 본 연구에서는, Fig. 1 에 보이는 바와 같이 단순하면서 사용하기 쉬운 구조가 검토되었다. 각 방향의 힘 측정을 위해 3 각 다리구조가 채택되었으며, 분해능의 향상 및 변형 집중을 위해서 힘센서부에는 각각 원통형 구멍을 적용하였다. 이러한 구조에 의해, 스타일러스와 측정 대상물의 접촉에 의한 측정력은 3 각 다리구조를 구성하는 세 개의 힘센서에 의해 검출되며, 각각의 출력값들로부터 스타일러스 선단에 위치하는 접촉지점에 작용하는 접촉력의 방향과 크기 파악이 가능하다. 결과적으로, 이러한 프로브 방식의 채택에 의해, 기존의 3 점 지지 터치-트리거 방식이 갖는 삼각형 형상의 왜곡이나 pre-travel 오차 발생 문제의 해결이 가능하게 되는 것이다.

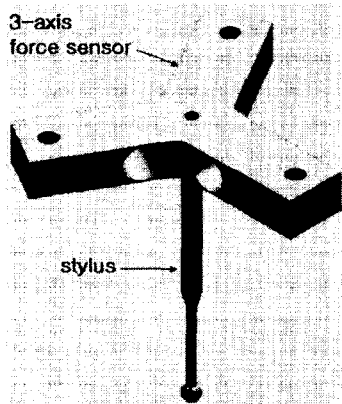


Fig. 1 Structure of the proposed probe of 3-leg structure

즉, 종래의 프로브와 달리, 실제 프로브가 정지

한 위치에서 외력을 측정하고, 그에 따라 스타일러스 선단의 위치와 그 지점에서 스타일러스에 작용하는 접촉력의 방향에 의해 접촉점을 산출함으로써 측정 대상물의 형상 정보를 왜곡없이 검출하게 된다.

프로브의 형상 설계를 위해, Fig. 2 에 보이는 바와 같은 구조를 갖는 힘센서부의 해석이 수행되었다. Fig. 2 에서 b 는 탄성체의 폭, t 는 원의 중심에서 윗면까지의 거리, L 은 원통구멍의 직경이 된다.

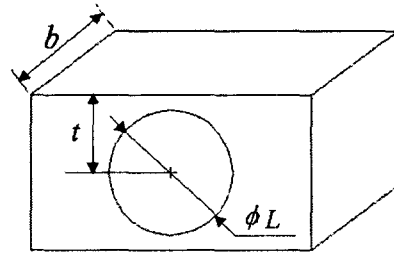


Fig. 2 The sensing part of the 3-axis force sensor

2.2 힘만 고려 할 경우

모멘트 성분을 무시하고 힘만 고려한 경우의 힘센서부의 상태를 Fig. 3 에 보인다. m 은 자유단의 변형각이 없기 때문에 고정단에서 발생하는 반력 모멘트의 1/2 이 된다. $t(x)/2$ 는 중립축에서 표면까지의 거리이다. 원통 구멍이 있는 부분을 제외한 다른 부분에서의 변형은 무시할 수 있을 정도라고 하면, 거리가 x 인 점에서의 반력은 식 (1)과 같이 주어진다.

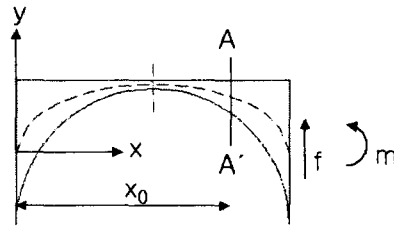


Fig. 3 The coordinate definition of the sensing part under the force F_y

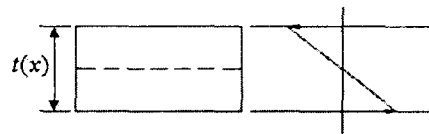


Fig. 4 Strain at the cross section A-A'

Fig. 4 에 고정단 끝부분으로부터 거리가 x_0 인 지점의 단면에 발생하는 응력 분포 상태를 보인다.

$$t(x) = t - \sqrt{(Lx - x^2)}$$

$$M(x) = \frac{f(2x - L)}{2} \quad (1)$$

최대응력은 표면에서 발생하며 표면에 대한 응력은 식 (2)와 같다.

$$\sigma_0(x) = \frac{3f(2x - L)}{bt(x)^2} \quad (2)$$

또, 표면응력에 대한 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\varepsilon = \frac{3f(2x - L)}{bEt(x)^2} \quad (3)$$

2.3 모멘트만 고려 할 경우

모멘트만 작용하는 경우는 중심에서 발생하는 모멘트가 그대로 전 부분에 대하여 작용하므로 Fig. 5 와 같이 나타낼 수 있다.

반력에 대한 응력값은 다음과 같다.

$$\sigma_0(x) = -\frac{6M_0}{bt(x)^2} \quad (4)$$

표면 응력에 대한 변형률은 다음에 주어진다.

$$\varepsilon = -\frac{6M_0}{bEt(x)^2} \quad (5)$$

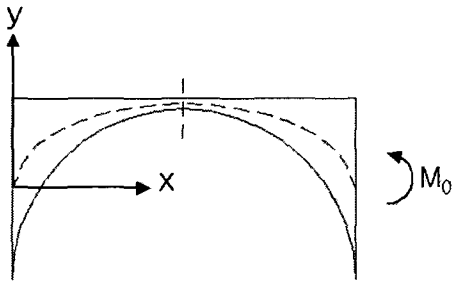


Fig. 5 The coordinate definition of the sensing part under the moment M_z

2.4 힘과 모멘트를 모두 고려할 경우

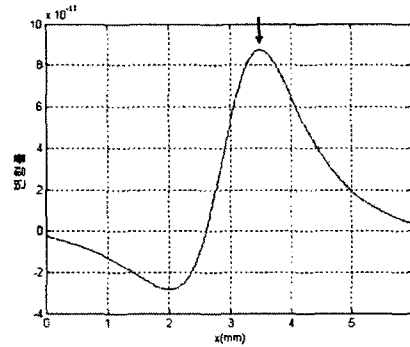
힘과 모멘트가 동시에 작용하는 경우는 각각의 응력의 합으로 나타낼 수 있으며 변형률 또한 각각

의 변형률(식(3), 식(5))의 합으로 나타내며 다음과 같다.

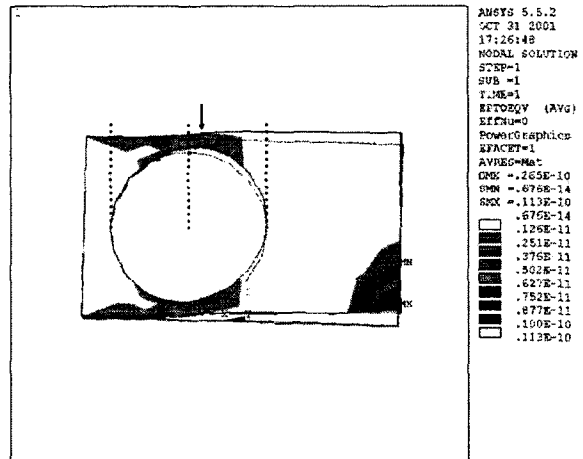
$$\varepsilon(x) = \frac{3(f(2x - L) - 2M_0)}{Ebt(x)^2} \quad (6)$$

본 설계에서는 충분한 변형이 가능하며 자중과 프로브의 무게를 지탱할 수 있도록 알루미늄 7075-0($E=72\text{Gpa}$)를 사용하고, 탄성부 두께 t 는 3.25 mm 로 하였으며, 폭 b 와 구멍직경 L 은 스트레인 게이지의 접착을 고려하여 각각 10 mm 와 6 mm 로 하였다.

결정된 변수값을 이용하여 Fig. 6(a)와 같은 결과를 얻을 수 있었으며 변형률은 x 가 3.5 mm 일 때 최대값을 보임을 알 수 있었다. 또한, Fig. 6(b)에 보이고 있는 FEM 해석 결과 역시 동일한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 위치가 힘센서부의 감도를 최대로 할 수 있는 게이지의 부착부위로 선정되었다.



(a) Total strain along the x-axis



(b) FEM analysis result

Fig. 6 Total strain of the sensing part

3. 입출력 관계

이상의 결과로부터, Fig. 7 에 보이는 바와 같이 스타일러스에 작용하는 접촉력 $F(F_x, F_y, F_z)$ 와 각각의 힘센서에 의해 검출되는 출력값 $V(V_1, V_2, V_3)$ 의 관계는 식(7)로 정리되어진다.

$$V = TF \quad (7)$$

식(7)에서 변환 매트릭스 T 는 매트릭스 C 와 상수 K 로 나타내며 식(8)과 같이 주어진다.

$$T = KC$$

$$C = \begin{bmatrix} 2h \cos 80^\circ & 2h \cos 10^\circ & (2x - L) \\ 2h \cos 20^\circ & 2h \cos 70^\circ & (2x - L) \\ 2h \cos 40^\circ & 2h \cos 50^\circ & (2x - L) \end{bmatrix}$$

$$K = \frac{GV}{Ebt(x)^2} \quad (G : \text{gauge factor}) \quad (8)$$

스타일러스에 작용하는 접촉력 F 는 식(9)에 의해 산출되어진다.

$$F = T^{-1}V \quad (9)$$

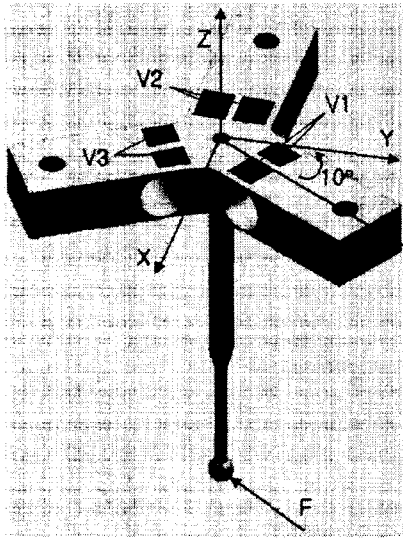


Fig. 7 The coordinate definition of the proposed probe

4. 오차 보정

실제의 프로브 제작에 있어, 재료의 물성, 가공 오차 그리고 조립오차, 스트레인게이지 부착위치 선정오차는 프로브 성능을 저하시키는 요인이 될 것이며, 이 밖에도 측정환경 변화 등의 다양한 외적

요인이 프로브의 성능 저하를 야기시킨다.

본 연구에서는 이와 같은 오차 요인 중에서 다른 요인들에 비해 상대적으로 프로브 신뢰성의 현저한 저하를 가져올 수 있는 제작시의 오차요인들을 대상으로 보정법을 검토하였다.

제작상 변경될 수 있는 주요 설계치수로 h, b, t, x 를 대상으로 하여, 입출력 관계식의 변환 매트릭스 $T(h, b, t, x)$ 를 식(10)의 보정된 변환 매트릭스 T^* 로 대체하기 위한 보정 시뮬레이션을 수행하였다.

$$T^* = K^*C^*$$

$$C^* = \begin{bmatrix} 2h^* \cos 80^\circ & 2h^* \cos 10^\circ & (2x^* - L) \\ 2h^* \cos 20^\circ & 2h^* \cos 70^\circ & (2x^* - L) \\ 2h^* \cos 40^\circ & 2h^* \cos 50^\circ & (2x^* - L) \end{bmatrix}$$

$$K^* = \frac{GV}{Eb^*t(x^*)^2} \quad (10)$$

단, $h^* = h + \Delta h$, $b^* = b + \Delta b$, $t^* = t + \Delta t$, $x^* = x + \Delta x$ 이다.

이론식에 의한 출력 전압과 실제 출력 전압의 차이가 오차 범위에 속하지 않을 경우, 변환행렬의 pseudo inverse 를 통한 행렬에 출력 전압의 차이를 적용하여 각 설계치수의 보정량을 산출하였으며, 이와 같이 보정된 값을 다시 이론식에 적용하여 출력 전압이 오차 범위에 속할 때까지 반복하였다.

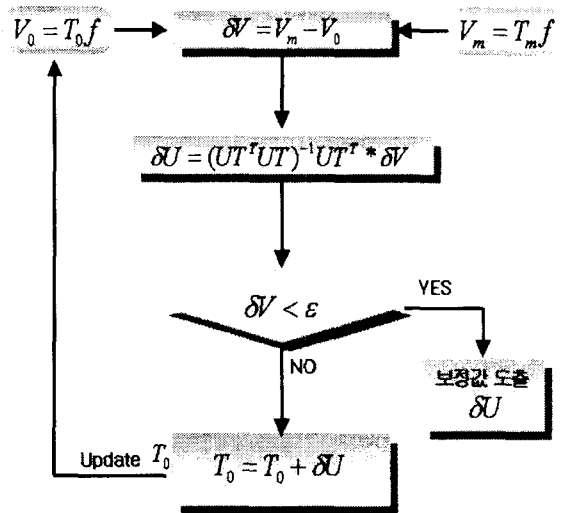


Fig. 8 Process of the error compensation

이상의 보정 과정을 Fig. 8 에 보이며, Fig. 9 에 그 결과를 보인다. 반복 횟수 증가에 따른 보정 효과를 확인할 수 있다. 물론, 실제 보정의 경우에는 측정범위 내의 다양한 입력값을 대상으로 하는 보정이 수행되고, 그들 결과들로부터 전체의 측정영역에 대해 보정 효과가 극대화 되도록 보정값의 최적화 과정이 추가적으로 요구된다.

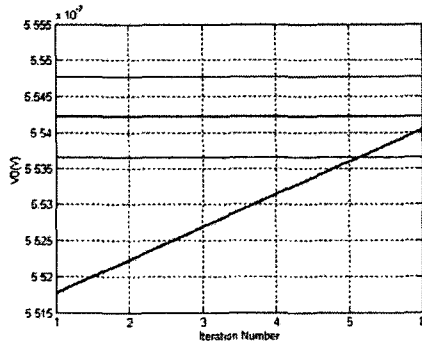


Fig. 9 Estimated real value of V_0 by error compensation

5. 결론

현재 CMM 에 가장 널리 사용되고 있는 터치 트리거 방식 프로브의 오차를 제거하여 CMM 의 측정 정밀도 향상을 목적으로 힘센서를 이용한 CMM 프로브를 개발하고, 또한 오차의 최소화를 위한 보정법을 제안한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 단순하면서 각 방향의 힘을 측정 할 수 있는 새로운 방식의 CMM 프로브를 제안하였다.
2. 이론식을 바탕으로 한 변환 행렬을 유도하고, 그로부터 프로브 하단부의 스타일러스에 작용하는 접촉력의 방향과 크기의 검출이 가능함을 확인하였다.
3. 2.에서 검출된 접촉력에 대한 정보로부터 스타일러스와 피측정물의 정확한 접촉점 위치 추정법을 제안하고, 이의 적용에 의해 종래의 터치 트리거 방식의 프로브가 갖는 중요 오차 요인에 의한 영향의 제거가 가능함을 보였다.
4. 적용상의 오차 최소화를 위해 제작 과정에 유입되는 오차의 보정법을 제안하였다.

참고문헌

1. W. Tyler Estler, S. D. Phillips, B. Borchardt, T. Hopp,

"Error compensation for CMM touch trigger probes," Precision Engineering 19, 85-97, 1996.

2. Paulo Cauchick Miguel, Tim King, Alvaro Abackerli, "A review on methods for probe performance verification," Elsevier Science Ltd. Measurement 23, 15-33, 1998.
3. J.R. Rene Mayer, Abdeljabbar Ghazzar, Olivier Rossy, "3D characterisation, modeling and compensation of the pre-travel of A kinematic touch trigger probe," Measurement 19(2), 83-94, 1996.
4. Yin-Lin Shen, Xianping Zhang, "Pre-travel compensation for vertically oriented touch-trigger probes with straight styli," Int. J. Mach. Tools Manufact. 37(3), 249-262, 1997.
5. Steven D. Bittle and Thomas R. Kurfess, "An active piezoelectric probe for precision measurement on a CMM," Elsevier Science Ltd. Mechatronics 7(4), 337-354, 1997.
6. Wim P. van Vliet, Peter H. J. Schellekens, "Development of a fast mechanical probe for coordinate measuring machines," Precision Engineering 22, 141-152, 1998.
7. Joao Bosco de Aquino Silva, M. Burdekin, "A modular space frame for assessing the performance of coordinate measuring machines (CMMs)," Precision Engineering 26, 37-48, 2002.